
Évaluation des réparations en béton et identification des principaux facteurs d'influence

B. Bissonnette,¹ L. Courard,² A. Garbacz,³ M. Jolin,¹ A. Vaysburd⁴ et von Fay, K.F.⁵

¹ CRIB, Département Génie Civil, Université Laval, Pavillon Adrien-Pouliot, 1065, avenue de la Médecine, Québec (Québec) G1V 0A6, Canada (benoit.bissonnette@gci.ulaval.ca)

² GeMME Matériaux de construction, Département ArGEnCo, Université de Liège, Liège, Belgique

³ Université des Technologies de Varsovie, Varsovie, Pologne

⁴ Vaycon Consulting, Baltimore, MD, U.S.A.

⁵ US Bureau of Reclamation, Denver, CO, U.S.A.

RÉSUMÉ. La réparation et le renforcement des structures existantes en béton comptent parmi les plus importants défis auxquels les ingénieurs civils sont confrontés aujourd'hui et qu'ils devront relever dans les années à venir. Les préoccupations actuelles concernant le développement durable favorisent la réfection au détriment de la construction neuve et ne peuvent que renforcer cette tendance. Des efforts concertés de la part des scientifiques et ingénieurs sont encore nécessaires afin d'améliorer la conception des réparations en béton et d'en assurer la qualité et la fiabilité attendues. L'un des aspects essentiels de la durabilité des réparations en béton et des revêtements ou traitements de surface est la qualité de l'adhérence entre le matériau de réparation et le béton existant. Le présent article résume les principales conclusions de travaux réalisés en collaboration en vue d'identifier les facteurs influençant l'adhérence des réparations (la rugosité, le degré de saturation et la carbonatation du substrat) et l'évaluation de celle-ci en conditions in situ (type de chargement, alignement de l'appareil). Sur la base des résultats recueillis, des recommandations ont été émises dans un guide du USBR.

ABSTRACT. Repair and strengthening of existing concrete structures are among the biggest challenges civil engineers are facing today and will have to face in the years to come. Present concerns of sustainable development emphasizing repair instead of new construction will only strengthen this trend. Concerted efforts towards improving the durability of concrete repairs are still needed from scientists and engineers. One of the critical aspects of durability of concrete repairs and overlays is lasting and sufficient interfacial bond between repair material and existing concrete substrate. This paper summarizes some of the findings of a collaborative study devoted to the most significant factors influencing bond in repairs (roughness, degree of saturation and carbonation of the substrate) and its field evaluation (type of loading, device misalignment). Based on the test results collected in different test programs, guideline-type recommendations for surface preparation prior to repair were issued in a USBR guideline.

MOTS-CLÉS: adhérence, béton, humidité, microfissuration, réparation, rugosité.

KEYWORDS: bond, concrete, microcracking, moisture, repair, roughness.

1. Introduction

Dans le domaine du génie civil, la réparation et la réhabilitation ont suscité une attention accrue ces dernières années. Bien que les ingénieurs réhabilitent de plus en plus de structures détériorées, le taux d'échec dans les projets de réparation d'ouvrages en béton demeure trop élevé. En raison de connaissances insuffisantes relativement à différents aspects fondamentaux, l'intervention se trouve parfois réduite à une approche de type *ça passe ou ça casse*.

L'objectif de la réparation est de prolonger la durée de vie utile d'une structure existante en rétablissant ses qualités d'origine (protection de l'armature, qualités esthétiques), sa capacité portante et/ou sa rigidité. L'une des conditions préalables pour obtenir une action composite satisfaisante est la durabilité de l'adhérence entre le substrat existant et le nouveau matériau mis en place. À cet égard, la préparation de la surface de l'élément en béton avant la mise en place du matériau de réparation est cruciale. En effet, quels que soient le matériau de réparation et la méthode d'application utilisés, la qualité de la surface préparée fera souvent foi du succès ou de l'échec d'un projet de réparation, ainsi que de la durabilité de la structure réparée.

L'adhérence d'une réparation sur le substrat existant est un phénomène complexe faisant intervenir différents types de liaisons [COU 00]: liaison chimique (réaction chimique entre le béton de support et le matériau de réparation), liaison mécanique (associée à l'interpénétration du matériau de réparation dans la rugosité et la porosité du substrat, provoquant un ancrage mécanique) et la liaison physique (forces de *van der Waals* et tensions de surfaces). Les diverses formes de liaison ont fait l'objet de plusieurs études au fil des années, ce qui a conduit à d'importants progrès dans la compréhension globale de la question [BIS 16]. Cependant, de nombreux aspects demeurent mal compris, comme par exemple leur influence relative sur le développement de l'adhérence sur un béton existant.

Dans le cadre d'un programme de recherche coopératif visant l'élaboration de critères de performance pour la préparation des surfaces en béton avant réparation, le travail expérimental rapporté se concentre sur les paramètres les plus influents du développement de l'adhérence. L'objectif général est de fournir à l'industrie des lignes directrices, incluant des critères de performance et des spécifications typiques pour la préparation des surfaces, pour la mise en œuvre systématique d'interventions durables.

Les objectifs spécifiques du programme étaient de:

- comparer les méthodes disponibles pour estimer les paramètres de rugosité d'une surface de réparation réparée;
- établir une corrélation entre les mesures d'adhérence (traction, cisaillement) et la rugosité de surface du substrat;
- évaluer quantitativement l'effet des défauts d'alignement sur les résultats de l'essai d'arrachement en traction;
- déterminer l'état humidité optimal dans le béton de support avant réparation;
- caractériser l'effet de la carbonatation sur l'adhérence.

2. Méthodologie

2.1. Évaluation de l'adhérence

Différentes séries d'essais ont été réalisées afin d'évaluer l'effet des paramètres évoqués précédemment sur l'adhérence de la couche de réparation. L'adhérence a généralement été évaluée au moyen d'essais d'arrachement en traction et dans certains cas, au moyen d'essais d'arrachement en torsion.

Pour l'évaluation de l'adhérence en traction, la méthode la plus exploitée est l'essai d'arrachement en traction (ex. : ASTM C1583, EN 1542:1999). Cette méthode d'essai consiste à forer une carotte ($d \geq 3 D_g$) dans la couche de réparation en traversant l'interface jusqu'au substrat, à coller une plaque de transfert cylindrique en acier sur le dessus de la carotte avec un adhésif approprié (typiquement un adhésif époxydique) et, au moyen d'un vérin spécial instrumenté, à tirer sur la plaque jusqu'à l'arrachement de la carotte. Lorsque la rupture se produit dans la zone d'interface entre la couche de réparation et le substrat, l'adhérence en traction est égale à la contrainte maximale enregistrée; lorsque la rupture se produit ailleurs de manière franche (substrat, couche de réparation), une valeur limite inférieure (conservatrice) est obtenue.

En conditions réelles de service, l'interface d'une réparation est soumise à la fois à des contraintes de traction et à des contraintes de cisaillement. À ce jour, très peu de résultats de mesures d'adhérence en cisaillement ont été rapportées dans la documentation scientifique. Des essais d'arrachement en torsion ont donc été effectués dans la présente étude afin d'évaluer la réponse en cisaillement et de la comparer à celle obtenue en traction. Dans cette procédure d'essai, le forage est effectué avec un carottier double à tubes concentrique. Une plaque de transfert annulaire collée à la surface et l'ensemble est soumis à un couple de torsion jusqu'à l'arrachement au moyen d'un vérin spécial instrumenté ancré à la surface. Dans le cas présent, le vérin utilisé était le même que celui utilisé pour les essais d'arrachement en traction, mais équipé d'adaptateurs spéciaux.

2.2. Influence de la rectitude d'alignement

Les essais d'arrachement sont généralement pratiqués en conditions *in situ*, dans des conditions rendant parfois difficile l'installation adéquate de l'appareillage (forage et essai). Afin d'évaluer la sensibilité des résultats expérimentaux à cet égard, des séries d'essais d'arrachement en traction ont été effectuées en induisant de manière contrôlée différents degrés de désalignement vertical. Une série de six dalles de béton de 600×400×100 mm a été fabriquée pour chacun des trois mélanges de béton (30 MPa, 40 MPa et 50 MPa). Après 28 jours de cure humide, les dalles en béton ont été préparées au jet de sable et les essais d'arrachement en traction ont été effectués suite à des carottages pratiqués à des angles d'inclinaison contrôlés de 0°, 2° et 4° par rapport à la verticale et des profondeurs de pénétration dans le substrat de 15 et 30 mm. Une analyse élastique complémentaire a été réalisée sur un code de calcul MEF.

2.3. Influence de la préparation de surface: rugosité et intégrité mécanique

Afin de couvrir un spectre suffisamment large en fait de rugosité et évaluer les techniques de préparation des surfaces les plus habituelles, les méthodes suivantes ont été sélectionnées pour les essais: jet de sable (SaB), grenailage (ShB), scarification (Sc), hydrodémolition à 100 MPa (HJ) et marteau à percussion de 7 kg (JH). En plus, afin d'éviter la présence de dommages induits et permettre ainsi de véritablement isoler l'effet de la rugosité sur la force de liaison, une dalle d'essai profilée artificiellement a été préparée. Pour ce faire, des matrices en acrylique usinées avec un profil ondulatoire triangulaire ont été installées à la base du coffrage afin de produire sur la face moulée de la dalle des ondes avec des amplitudes respectives de 2, 4, 6 et 8 mm (longueur d'onde constante de 30 mm) réparties en quatre zones adjacentes couvrant chacune le quart de la longueur de la dalle (voir Figure 1).

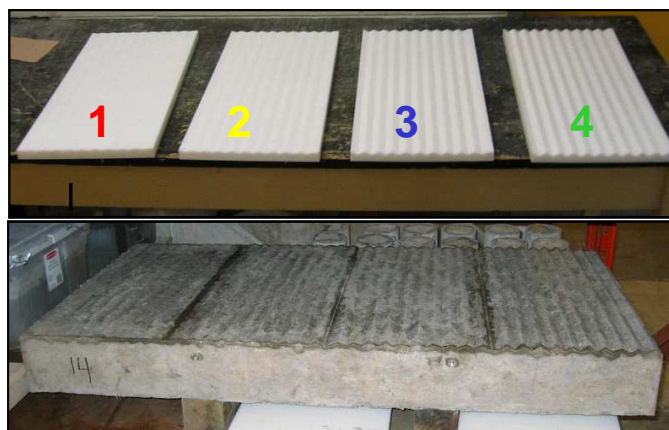


Figure 1. Matrices en acrylique usinées ($A = 2, 4, 6$ et 8 mm; $\lambda = 30$ mm) avec un profil ondulatoire et surface résultante de la dalle profilée artificiellement.

Dans le cadre du programme d'essais rapporté ici, deux séries de dalles béton de 625×1250×150 mm (bétons de 25 MPa et 35 MPa) ont été fabriquées. Les dalles d'essai ont été exposées au séchage dans le laboratoire jusqu'à l'atteinte d'une stabilité dimensionnelle relative, après quoi les opérations de préparation des surfaces ont été effectuées. La dalle profilée artificiellement a quant à elle été très légèrement préparée au jet de sable pour éliminer la laitance.

Au terme des opérations de préparation des surfaces, la rugosité et l'intégrité mécanique des surfaces ont été évaluées sur chacune des dalles d'essai.

La rugosité de surface des dalles en béton a été évaluée en utilisant un dispositif de profilométrie optique de type *Moiré*. La méthode a l'avantage de capturer toute l'information nécessaire en un laps de temps très court et de la stocker sous un format numérique pour le post-traitement, ce qui permet une caractérisation précise et détaillée du profil de surface. Le paramètre utilisé ici pour décrire quantitativement la rugosité de surface est la demi-amplitude moyenne (R_a) du profil. De façon complémentaire, les profils de surface des dalles d'essai ont également été évalués suivant l'échelle de l'indice CSP (*concrete surface profile*) proposé par le *International Concrete Repair Institute* [ICR 97].

L'intégrité de surface des dalles préparées a été évaluée de deux façons, soit au moyen d'essais d'arrachement en traction et au marteau *Schmidt*. Recherchant un moyen simple et facilement exploitable en conditions *in situ* pour évaluer l'intégrité de surface avant réparation, des sondages au marteau *Schmidt* ont en effet été réalisés de façon systématique sur toutes les dalles préparées, à l'aide d'un gabarit comportant des points de mesure espacés régulièrement dans les directions X et Y sur l'ensemble de la surface. Des tests d'arrachement en traction ont été effectués immédiatement après les sondages *Schmidt*, conformément à la procédure proposée par Courard et coll. [COU 04].

Une fois les mesures de rugosité et d'intégrité complétées, les dalles ont été soumises à des essais d'arrachement en traction et torsion, répartis de manière systématique avec le même gabarit. Il convient de mentionner que dans le cas de la dalle profilée artificiellement, l'adhérence a été déterminée en traction directe (essais sur presse) sur des carottes extraites des dalles.

2.4. Évaluation de la teneur en humidité du substrat

Dans cette partie du programme, deux procédures sur l'humidité de surface en béton ont été étudiées, soit le test d'absorption initiale de surface (ISAT) et une version modifiée du test de succion capillaire (MCST) [COU 11]. L'objectif était de corréler l'état de saturation de la surface réceptrice en béton avec les caractéristiques de pénétration de l'humidité évaluées par ces tests, de manière à disposer d'une méthode quantitative simple pour l'évaluation *in situ* de l'état d'humidité d'une surface en béton.

Trois séries de corps d'épreuve ont été fabriquées avec des bétons ordinaires à base de ciment Portland (C30/37, C40/50 et C50/60). Les traitements de surface suivants ont été effectués sur des sous-ensembles d'éprouvettes de chaque série: sans traitement (référence), jet de sable et jet d'eau sous pression. Les dalles d'essais ont ensuite été soumises à différentes séquences de conditionnement en humidité (combinaisons variées de séquences d'entreposage dans l'air à 50 % H.R., 85 % H.R., 100 % H.R., dans l'eau, et / ou dans une étuve à 40 °C) pour obtenir huit niveaux d'humidité couvrant un spectre d'humidité relative de 30 à 100 % [COU 11]. Après stabilisation et évaluation de la teneur en eau (mesures gravimétriques effectuées sur des éprouvettes témoins), les dalles ont fait l'objet de mesures au moyen des techniques ISAT et MCST.

Des dalles préparées au jet de sable et assujetties aux mêmes séquences de conditionnement (pour H.R. = 50 à 100 % H.R.) ont finalement été ragréées avec une couche de 10 mm de l'un ou l'autre de deux mortiers modifiés aux polymères (mortiers A ou B, à base d'acrylique) de 10 mm d'épaisseur, après application d'un coulis modifié aux polymères (état sec ou humide). Les dalles d'essai réparées ont été placées en cure humide pendant 7 jours, puis exposées à l'air jusqu'à ce que les essais d'arrachement en traction soient effectués.

2.5. Évaluation de l'effet de la carbonatation sur l'adhérence

Dans cette partie du projet, une série de dix-huit dalles de 400×400×100 mm a été fabriquée avec un mélange de béton de 28 MPa. Pour la moitié de ces dalles, la surface a été préparée superficiellement au jet de sable alors que pour l'autre moitié, un marteau à percussion léger a été utilisé. Dans chaque groupe, quatre dalles ont été protégées de la carbonatation (dalles témoins), les cinq autres subissant une exposition au CO₂ contrôlée dans un cabinet de carbonatation en laboratoire. Les dalles témoins ont été protégées par une feuille de plastique et du ruban adhésif afin d'y prévenir la carbonatation. Les dalles ont été conditionnées pendant 75 jours. À cette échéance, dans les dalles conservées en cabinet, la profondeur de carbonatation atteignait plus de 3 mm. Les dalles témoins et les dalles carbonatées ont alors été resurfacées avec une chape en béton ordinaire (28 MPa) de 100 mm d'épaisseur. Au total, neuf essais d'arrachement en traction ont été pratiqués sur chacune des dalles réparées.

3. Résultats et analyse

3.1. Influence de la préparation de la surface

3.1.1. Rugosité du substrat

Les valeurs de rugosité (demi-amplitude R_a) correspondant aux différents profils de préparation de surface, tel qu'obtenues par profilométrie optique, sont présentées sur le graphique de la Figure 2. À titre indicatif, les valeurs enregistrées pour les gabarits en caoutchouc ICRI CSP sont également affichées sur ce graphique. Les plus grandes valeurs de demi-amplitude (de 1,5 à 3,8 mm) ont été obtenues pour le marteau à percussion et l'hydrodémolition, tandis que les valeurs les plus basses ont été enregistrées respectivement pour la scarification, le grenaillage et le jet de sable (< 1 mm). Il peut également être observé que pour toutes les dalles et gabarits ICRI caractérisés, la rugosité de surface est relativement uniforme, la plupart des points reposant sur ou très près de la ligne d'égalité.

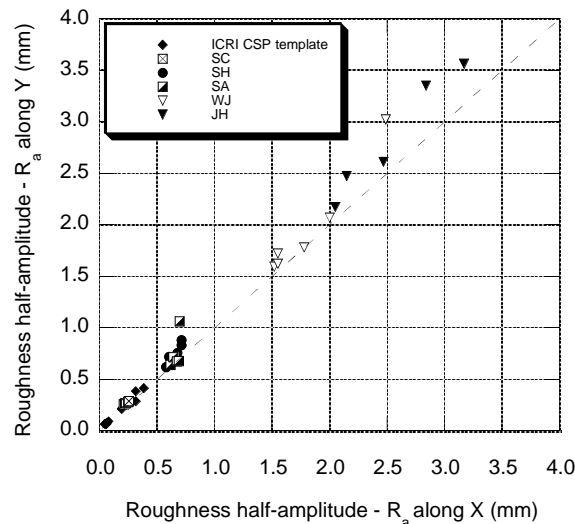


Figure 2. Résultats des mesures de rugosité effectuées par profilométrie optique sur des dalles de béton (25 et 35 MPa) préparées avec différentes techniques (ici et par la suite dans l'article: SC: scarification; SH: grenaillage; SA: jet de sable; WJ: hydrodémolition; JH: marteau-piqueur).

Comme le montre le graphique de la Figure 2, les plaques ICRI CSP couvrent à peine les valeurs de rugosité enregistrées pour la scarification, toutes les autres techniques étant hors de leur spectre de détection pour les conditions expérimentales considérées. Aussi pratiques soient les gabarits CSP, leur utilisation est ainsi limitée aux traitements de surface légers visant essentiellement à accroître la rugosité, sans retranchement significatif de béton.

Il est important par ailleurs de souligner que le type de rugosité considéré dans cette étude est la *méso-rugosité*, laquelle est étroitement associée à la distribution granulométrique du béton. Lors du traitement des résultats, la grande ondulation caractérisant par exemple les surfaces traitées au marteau à percussion et par hydrodémolition est extraite par filtrage du signal. Quoi qu'il en soit, les valeurs de R_a obtenues suggèrent que ces deux techniques exposent davantage les plus gros granulats que ne le font les autres méthodes considérées.

3.1.2. Intégrité mécanique du substrat

Les résultats des essais d'arrachement en traction effectués sur les dalles d'essai préparées avec différentes méthodes de démolition sont résumés sur la Figure 3. Globalement, les résultats obtenus respectivement avec les substrats de 25 MPa et 35 MPa sont cohérents avec les résultats des essais de caractérisation mécanique des bétons correspondants. Il peut de plus être observé que pour chacune des deux séries, les contraintes d'arrachement moyennes obtenues pour les dalles préparées par jet de sable, grenaillage et scarification s'approchent de la résistance en traction du béton de support. Ces substrats ont donc conservé leur intégrité mécanique superficielle malgré les opérations de préparation de surface. De fait, dans la plupart des essais, la rupture s'est produite au fond de la carotte, loin de la surface.

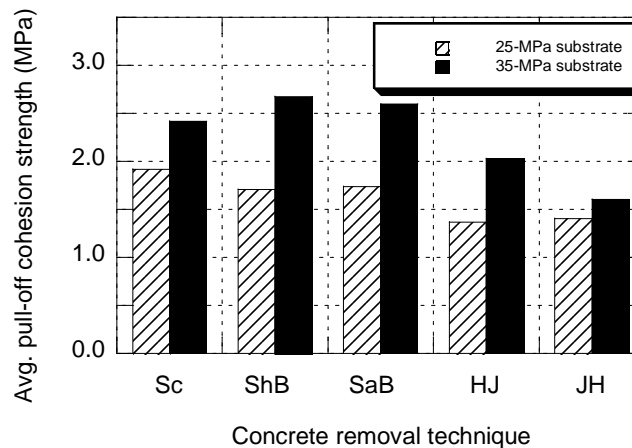


Figure 3. Résultats des essais d'arrachement en traction (CSA A23.2-6B modifiée) effectués sur les dalles d'essai après les opérations de préparation pour en évaluer l'intégrité mécanique superficielle.

En comparaison, les contraintes d'arrachement en traction moyennes enregistrées pour les dalles préparées au marteau-piqueur sont nettement inférieures, en particulier pour le béton de 35 MPa. Ceci traduit vraisemblablement la présence de défauts localisés en surface induits par la pointe de marteau, comme en témoigne le grand nombre de ruptures enregistrées près de la surface dans les essais. Ces dommages induits dans le substrat par les marteaux à percussion, typiquement associés à de la fissuration localisée, ont été évalués dans une précédente étude [BIS 06].

Dans le cas de l'hydrodémolition, comme tendent à le démontrer subséquentement les résultats des essais d'arrachement en traction sur dalles réparées, les contraintes d'arrachement en traction plus basses enregistrées ne sont probablement pas dues à de l'endommagement (ruptures survenues majoritairement dans la masse), mais plutôt à l'incidence de la forte ondulation de la surface produite par l'hydrodémolition sur la réalisation des essais d'arrachement. Bien qu'une attention particulière ait été portée lors de l'installation des rondelles de transfert pour assurer un alignement adéquat du dispositif d'essai, la forte ondulation de la surface n'a apparemment pu être entièrement compensée.

Les sondages au marteau *Schmidt* effectués sur les dalles justes après la préparation de surface sont résumés sur le graphique de la Figure 4.

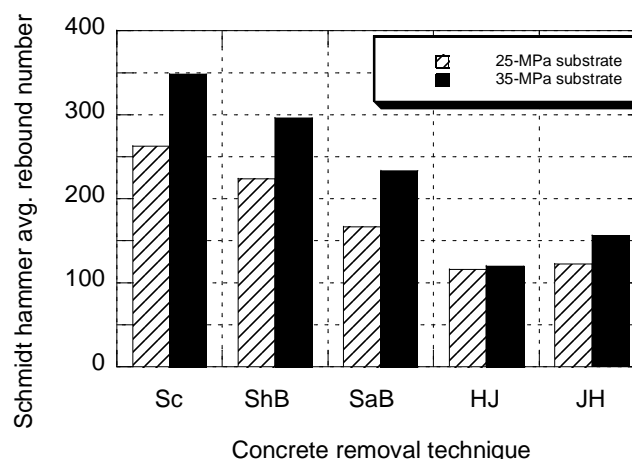


Figure 4. Résultats des sondages au marteau *Schmidt* (ASTM C805) effectués sur les dalles d'essai après les opérations de préparation pour en évaluer l'intégrité mécanique superficielle.

Comme la mesure de rebond enregistrée avec le marteau *Schmidt* est fonction de la dureté et de la résistance mécanique du matériau, il n'est pas non plus surprenant de constater que quelle que soit la technique de préparation de la surface, les valeurs moyennes de rebond enregistrées sur les dalles fabriquées avec le béton de 35 MPa sont systématiquement plus élevées que celles obtenues sur les dalles fabriquées avec le béton de 25

MPa. Les valeurs de rebond enregistrées montrent une variabilité importante, comme en témoignent les écarts-types relativement élevés. Ce résultat n'est pas inattendu, étant donné la variabilité intrinsèque des essais et la forte irrégularité de la surface testée. Quoi qu'il en soit, les tendances moyennes affichées par les résultats des sondages au marteau *Schmidt* pour les différentes techniques de préparation de surface étudiées sont en quelque sorte semblable à celles observées pour les résultats des mesures d'arrachement en traction. Il apparaît donc que pour les surfaces ne présentant pas une ondulation trop prononcée, le marteau *Schmidt* peut fournir des renseignements utiles sur l'intégrité du substrat, à condition que le nombre et la distribution des sondages soient adéquats.

3.1.3. Évaluation de l'adhérence

Les résultats des mesures d'adhérence en traction et en cisaillement réalisées sur les dalles expérimentales préparées avec différentes méthodes d'enlèvement du béton et ensuite réparées sont présentés sur les Figures 5 à 7.

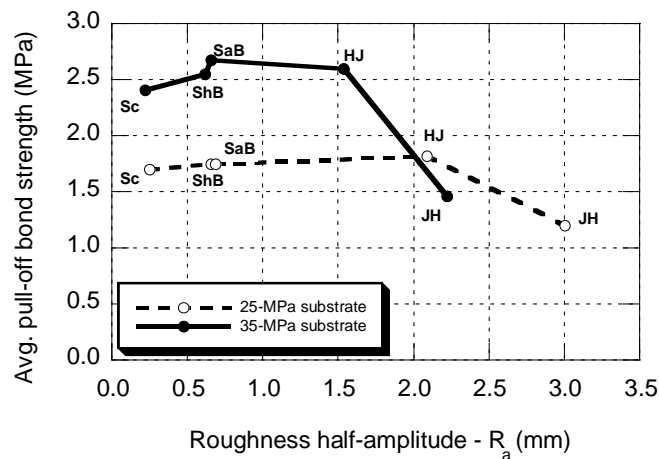


Figure 5. Résultats des essais d'arrachement en traction (ASTM C1583) effectués après réparation sur les dalles d'essai préparées avec différentes techniques.

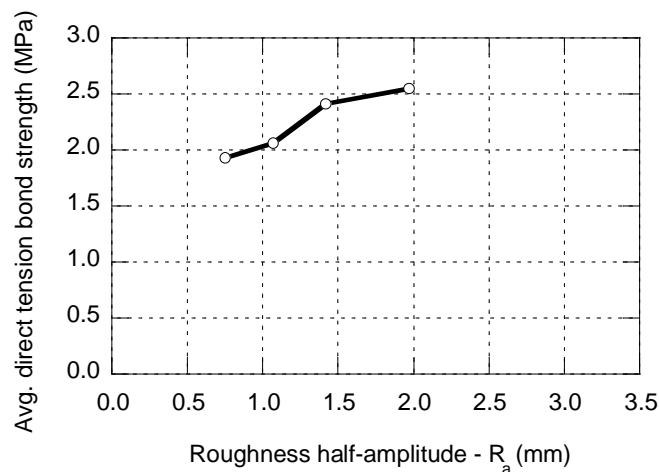


Figure 6. Résultats des essais d'arrachement en traction (ASTM C1583) effectués après réparation sur la dalle d'essai profilée artificiellement.

Essais d'arrachement en traction (pull-off)

Pour l'ensemble des dalles testées, à l'exception de celles préparées au marteau-piqueur, les résultats des essais d'arrachement en traction (Figure 5) sont comparables aux valeurs de résistance en fendage moyennes du béton constitutif du substrat, tant pour la série de dalles de 25 MPa que celles de 35 MPa ($f_{st-28j} = 1.9$ et 3.2 respectivement). Dans le cas des dalles de 25 MPa, pour lesquelles les résultats sont particulièrement proches de la résistance mécanique du substrat, la rupture est survenue systématiquement dans le substrat lors des essais d'arrachement, sauf encore une fois pour les dalles préparées au marteau-piqueur.

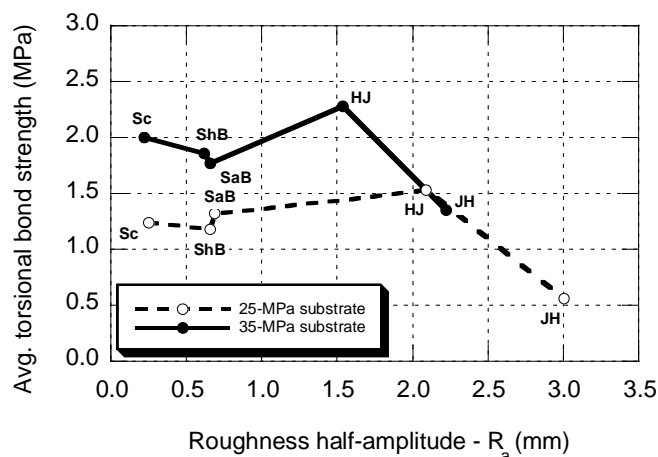


Figure 7. Résultats des essais d'arrachement en torsion effectués après réparation sur les dalles d'essai préparées avec différentes techniques.

Dans le cas des dalles préparées au marteau-piqueur, même si un appareil léger (7 kg) a été utilisé, les valeurs de résistance à l'arrachement enregistrées sont significativement plus basses et, pour un grand nombre d'essais (> 90%), la rupture s'est produite dans la zone d'interface. Comme pour les mesures de résistance en traction superficielle, cela est vraisemblablement attribuable à la présence de défauts locaux induits dans le substrat lors des opérations d'enlèvement du béton.

En ce qui concerne l'influence de la rugosité superficielle du substrat sur l'adhérence de la réparation, les résultats présentés sur le graphique de la Figure 5 tendent à démontrer que la résistance à l'arrachement augmente avec l'accroissement de la rugosité de la surface réparée, dans la mesure où celle-ci n'est pas endommagée. Lorsque des dommages sont induits ou laissés à la surface du substrat, comme c'est selon toute vraisemblance le cas ici avec le marteau-piqueur, l'influence positive de l'augmentation de la rugosité s'en trouve atténuée, voire complètement annulée, suivant l'ampleur et la sévérité des défauts.

En accord avec ces tendances, les résultats des essais effectués sur des carottes extraites de la dalle profilée artificiellement (Figure 6) montrent de façon très nette que l'adhérence en traction augmente avec l'amplitude de la rugosité du substrat. Cela tend à confirmer que l'accroissement de la surface de contact associé à une plus forte rugosité favorise une adhérence accrue de la réparation, dans la mesure où les opérations de profilage n'induisent pas de microfissuration et/ou autres dommages significatifs.

Essais d'arrachement en torsion

Les résultats des essais d'arrachement en torsion sont présentés sur le graphique de la Figure 7. Aussi bien en ce qui concerne l'amplitude des valeurs enregistrées que les tendances relevées, ces résultats montrent des similitudes avec ceux d'arrachement en traction. Ici encore, la résistance du substrat et la présence de dommages sont des paramètres influents. Contrairement à ce qui aurait pu être anticipé sur une base intuitive, la rugosité ne semble pas jouer un rôle plus important en cisaillement qu'en traction.

3.2. Influence d'un désalignement sur les résultats de l'essai d'arrachement en traction

Les résultats théoriques et expérimentaux présentés sur le graphique de la Figure 8 montrent que les valeurs de résistance à l'arrachement enregistrées diminuent à mesure que l'angle de désalignement par rapport à la verticale augmente. Évidemment, plus la profondeur de carottage est importante, plus l'effet d'excentricité qui en résulte est grand et affecte négativement la résistance enregistrée.

Jusqu'à un désalignement vertical de l'ordre de 4° , valeur considérée dans cette étude comme limite approximative de détection du désalignement par l'œil humain moyen, les résultats des simulations n'ont pas permis de relever de différences significatives dans les champs de contrainte générés respectivement par un désalignement du forage et un désalignement de la charge d'arrachement. À des fins de calculs pratiques, ils peuvent donc être traités de manière similaire. Quant au mode de rupture, on peut considérer que pour un désalignement n'excédant pas 4° , les caractéristiques du mode de rupture dans l'essai d'arrachement en traction ne sont pas affectées de manière significative.

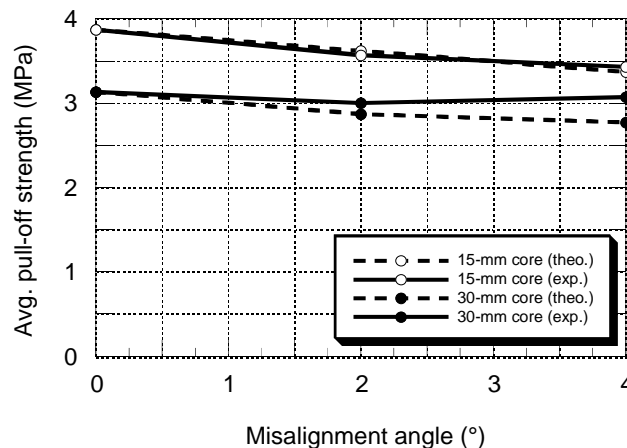


Figure 8. Influence de l'angle de désalignement sur les résultats des essais d'arrachement en traction: comparaison des résultats théoriques et expérimentaux.

Les résultats des simulations suggèrent une limite inférieure conservatrice pour l'évaluation de l'influence du désalignement sur les résultats des essais d'arrachement en traction. Pour des profondeurs de carottage de 15 et 30 mm respectivement, on peut s'attendre à une réduction de l'ordre de 7 à 9 % de la résistance à l'arrachement dans le cas d'un désalignement de 2°, et de 13 à 16 % dans le cas d'un désalignement de 4°.

Les résultats expérimentaux des essais d'arrachement en traction sont comparables aux résultats des calculs théoriques, bien que les tendances s'en dégagant ne soient pas aussi claires, en raison vraisemblablement de la variabilité expérimentale et de l'influence additionnelle de la profondeur du carottage.

D'un point de vue pratique, les résultats obtenus dans cette étude montrent que le désalignement dans les essais d'arrachement peut causer le rejet d'une réparation ayant une adhérence en traction satisfaisante. Dans la mesure où le nombre d'essais réalisés serait suffisamment important, on pourrait spécifier une limite inférieure comme critère d'acceptation de la résistance à l'arrachement, la valeur moyenne acceptable étant diminuée par exemple de 5 à 10 % afin de prendre en compte le biais induit par les problèmes de désalignement dans les essais. Le nombre d'essais réalisés typiquement aux fins des opérations de contrôle de la qualité sur site est toutefois largement insuffisant pour ce faire et, de toute façon, l'utilisation de l'adhérence spécifiée comme limite d'acceptation est conservatrice.

3.3. Influence de la teneur en humidité

L'essai ISAT (indice de perméabilité) que l'essai MCST affichent tous deux une relativement bonne corrélation avec la teneur en humidité du béton, en particulier à un niveau inférieur à 80 % HR [COU 11].

Les résultats des essais ISAT se sont révélés insensibles à la résistance en compression du béton dans la gamme de formulations testée. Les résultats ont été influencés par la qualité de la surface du substrat, mais il est difficile de conclure si cela est dû à la rugosité de surface, à la microfissuration ou à la combinaison des deux paramètres. La variation relativement élevée et la dispersion caractérisant les résultats des essais ISAT peuvent provenir de la difficulté à effectuer les essais sur des surfaces de béton au profil fortement accidenté (profil obtenu par exemple après l'hydrodémolition).

L'essai MCST a produit des tendances claires et des informations moins dispersées que celles de l'ISAT, de même qu'une meilleure corrélation avec les mesures de teneur en eau (mesures massiques). Une corrélation satisfaisante a par ailleurs été observée entre l'indice d'absorption de l'eau et le coefficient d'absorption capillaire déterminés respectivement à partir des résultats des deux essais.

L'influence de la teneur en humidité du substrat sur l'adhérence d'un matériau de réparation est illustrée sur la Figure 9 pour un mortier modifié aux polymères. Globalement, pour les systèmes de réparation considérés dans le projet, le niveau de saturation optimal pour l'adhérence des réparations se situe entre 55 et 90 %.

Il est clair que des travaux supplémentaires sont nécessaires afin d'identifier une méthode utilisable en conditions *in situ* et, en outre, pour évaluer de manière plus précise et fiable les fourchettes de niveaux de saturation optimaux pour les matériaux de réparation à base cimentaire.

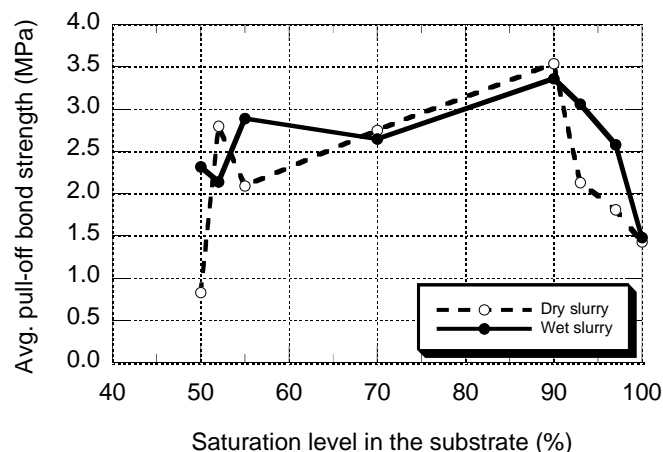


Figure 9. Résultats des essais d'arrachement en traction (EN 1542:1999) effectués sur des dalles d'essai réparées à différents niveaux de saturation avec un mortier de réparation modifié aux polymères, mis en place après application d'un coulis modifié aux polymères (sec ou humide).

3.4. Influence de la carbonatation

Les résultats des essais de d'arrachement en traction enregistrés pour des dalles soumises à deux types de préparation (SaB et JH) et ensuite réparées avec un béton de 28 MPa, avec ou sans carbonatation de la surface, sont illustrés sur le graphique de la Figure 10. Pour les dalles préparées au jet de sable, aucune différence notable n'est relevée entre les substrats en béton carbonatés et non carbonatés. À l'inverse, pour les dalles préparées au marteau-piqueur, une réduction de 16 % de la contrainte d'arrachement moyenne a été enregistrée pour les substrats carbonatés par rapport à ceux non carbonatés. Ces résultats en apparence contradictoires sont peut-être attribuables aux défauts induits sous la surface des dalles d'essai préparées au marteau-piqueur. Le nombre limité d'essais réalisés avec un seul type de matériau de réparation ne permet toutefois pas de tirer des conclusions générales quant à l'effet global de la carbonatation sur la l'adhérence d'une réparation. Différents matériaux de réparation n'obéiront pas nécessairement aux mêmes tendances en ce qui a trait au développement de l'adhérence sur une surface réceptrice carbonatée. Il semble probable cependant que la carbonatation n'ait qu'un faible impact sur l'adhérence d'une surface en béton adéquatement préparée, exempte de microfissuration et autres défauts.

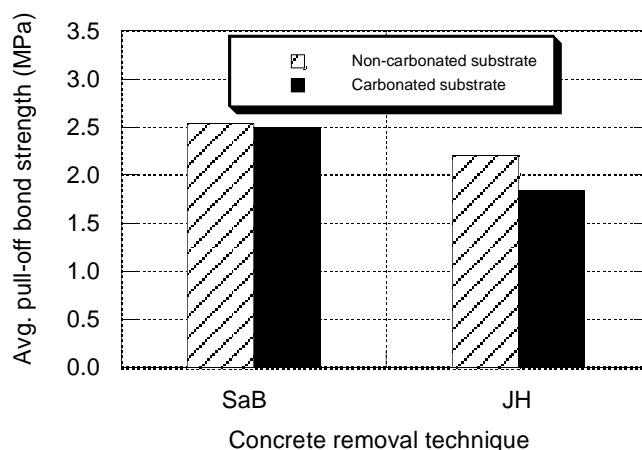


Figure 10. Résultats des essais d'arrachement en traction (ASTM C1583) effectués sur les dalles d'essai préparées avec différentes techniques, à l'état non carbonaté ou carbonaté.

4. Conclusion

L'étude a généré des données et informations fort utiles pour l'évaluation et la caractérisation de la préparation d'une surface en béton avant réparation.

L'essai d'arrachement en traction est une méthode de caractérisation *in situ* très pratique, non seulement pour l'évaluation de l'adhérence d'une réparation, mais également pour l'évaluation de la résistance en traction et de l'intégrité mécanique d'une surface en béton préalablement à la réparation. Une évaluation fiable de ces propriétés peut être obtenue, à condition qu'un nombre minimum d'essais soit effectué avec un équipement et un protocole expérimental adéquats. En-deçà de la limite de détection des défauts d'alignement (forage ou installation du vérin) à l'œil nu, l'erreur potentielle maximale sur la mesure a été évaluée à environ 15 %. Dans le cadre d'essais pour le contrôle de la qualité, ce biais ne peut toutefois affecter l'évaluation de la résistance à l'arrachement que de façon conservatrice.

L'adhérence d'une réparation du béton dépend d'un certain nombre de paramètres. Il a été démontré qu'en l'absence de dommages induits dans le substrat, l'adhérence en traction augmente avec l'accroissement de la rugosité du substrat. Le paramètre le plus important demeure toutefois l'intégrité mécanique du béton de la surface réceptrice. À cet égard, il faut souligner que les équipements à percussion comme le marteau-piqueur induisent des dommages potentiellement importants sur la surface préparée, lesquels peuvent facilement annuler les bénéfices d'une rugosité accrue.

L'humidité et l'état de carbonatation du substrat constituent d'autres paramètres importants de la surface dont il importe de considérer l'influence sur le développement de l'adhérence d'une réparation. Les résultats obtenus dans la présente étude montrent que le niveau optimal de saturation pour le développement de l'adhérence dans une réparation se situerait entre 50 et 90 % H.R. Dans la mesure où la préparation adéquatement effectuée, la carbonatation semble quant à elle avoir relativement peu d'impact sur l'adhérence.

Sur la base des résultats du programme de recherche présentés dans cet article, un guide intitulé « *Best Practices for Preparing Concrete Surfaces Prior to Repairs and Overlays* » et visant plus spécifiquement les réparations et revêtements avec des matériaux à base de ciment Portland a été émis par le U.S. Bureau of Reclamation [BIS 12]. Par ailleurs, ces questions sont abordées en détail dans un ouvrage récent proposant une revue exhaustive des notions fondamentales de l'ingénierie des surfaces en béton [BIS 16].

5. Remerciements

Ce projet a été soutenu financièrement par le Concrete Research Council de l'American Concrete Institute (ACI), le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), le Fonds de Recherche Québécois sur la Nature et les Technologies (FRQNT), le U.S. Bureau of Reclamation (USBR), et les partenaires industriels de la *Chaire CRSNG sur la Réparation durable et l'entretien optimisé des infrastructures en béton* à l'Université Laval (BASF, Euclid, Holcim, Hydro-Québec, Kerneos, King Packaged Materials, Lafarge, Ministère des Transports de Québec, Ville de Montréal, Ville de Québec, W.R. Grace & Co.), et à travers les programmes de coopération scientifiques des gouvernements polonais, québécois et de Wallonie-Bruxelles.

6. Références

- [ACE 92] CRD-C 164, Standard Test Method for Direct Tensile Strength of Cylindrical Concrete or Mortar Specimens, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA, 1992.
- [AST 02a] ASTM C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates*, volume 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- [AST 02b] ASTM C805, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates*, volume 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- [AST 04a] ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates*, volume 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2004.
- [AST 04b] ASTM C1583, Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension. Pull-off Method), *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates*, volume 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2004.
- [AST 05] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates*, volume 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2005.

- [BIS 06] Bissonnette, B., Courard, L., Vaysburd, A.M., « Concrete removal techniques – Influence on residual cracking and bond strength », *Concrete International*, vol. 28, n° 12, 2006, p. 49-55.
- [BIS 12] Bissonnette, B., Vaysburd, A.M., Von Fay, K.F., Best practices for preparing concrete surfaces prior to repairs and overlays, Report Number MERL 12-17, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO, USA, 2012, 92 p.
- [BIS 16] Bissonnette B., Courard L., Garbacz, A. *Concrete surface engineering*, Modern Concrete Technology (18), CRC Press, Taylor and Francis Group, 2016, 258 p.
- [COU 00] Courard, L., « Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products », *Materials and Structures*, vol. 33, n° 225, 2000, p. 65-72.
- [COU 04] Courard, L., Bissonnette, B., « Essai dérivé de l'essai d'adhérence pour la caractérisation de la cohésion superficielle des supports en béton dans les travaux de réparation : analyse des paramètres d'essai », *Materials and Structures*, vol. 37, n° 269, 2004, p. 342-350.
- [COU 11] Courard, L., Lenaers, J.F., Michel, F., Garbacz A., « Saturation level of the superficial zone of concrete and adhesion of repair systems », *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 5, 2011, p. 2488-2494.
- [CSA 00] CSA A23.2-6B, Method of Test to Determine Adhesion by Tensile Load, *CSA A23.2-00 Methods of Test for Concrete*, Canadian Standards Association, Rexdale, ON, Canada, 2000.
- [ECS 99] EN 1542:1999, Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Measurement of bond strength by pull-off, Work Item Number 00104089, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1999.
- [ICR 97] ICRI Guideline No. 03732, Selecting and Specifying Concrete Surface Preparation for Sealers, Coatings, and Polymer Overlays, International Concrete Repair Institute, Des Plaines, IL, USA, 1997.